

## Реализация профилирования в твердомерах с использованием подходов СЗМ

Е.В. Гладких, К.С. Кравчук, И.И. Маслеников, А.А. Русаков, С.В. Прокудин, А.С. Усеинов

*ФГБНУ ТИСНУМ, 108840, Троицк, Москва, Россия  
ekat.gladkih@yandex.ru*

Реализован режим профилирования на твердомерах семейства «НаноСкан-4D», основанный на регистрации фазового сдвига между возбуждающей силой и возникающими колебаниями. Были определены оптимальные режимы работы, обеспечивающие высокую скорость профилирования при минимальном механическом воздействии на поверхность образца.

## Implementation of profiling in hardness testers with application of SPM methods

E.V. Gladkikh, K.S. Kravchuk, I.I. Maslennikov, A.A. Rusakov, S.V. Prokudin, A.S. Useinov

*FSBI TISNCM, 108840, Troitsk, Moscow, Russia*

The profiling mode in NanoScan-4D family hardness testers is based on recording the phase shift between the generating force and the excited oscillations. Optimal parameters were determined to provide a high velocity of profiling with minimal mechanical influence on the surface of the sample.

Отличительной особенностью современных сканирующих зондовых микроскопов является использование миниатюрных кремниевых кантилеверов для фиксации факта контакта острия зонда с исследуемой поверхностью. Типичный наноиндентер, то есть прибор для измерения твёрдости и модуля Юнга материала методом инструментального индентирования, использует подвижную сенсорную систему весом в миллионы раз большим, чем вес стандартного кантилевера. При этом жёсткость системы подвеса твёрдого индентора в сотни и тысячи раз выше жёсткости кантилевера. Резонансные частоты сенсорного модуля наноинденторов редко превышают сотню герц, то есть в тысячи раз ниже, чем у типичного кантилевера. Таким образом, типичный наноиндентор является достаточно грубым с точки зрения СЗМ прибором, мало пригодным для исследования топографии поверхности. Тем не менее, благодаря высокому разрешению по силе и смещению, работая в режиме резонансного возбуждения, типичный наноиндентор может быть использован для изучения изделий сложной формы и измерения механических и фрикционных свойств объёмных материалов и тонких покрытий во время сканирования с микронным пространственным разрешением [1].

В качестве нанотвердомера в представленном исследовании использовался прибор НаноСкан-4D с резонансной частотой системы подвеса индентора 80 Гц, массой подвижной части 30 г и жесткостью системы подвеса 7 кН/м. При этом добротность системы подвеса индентора  $Q$  равнялась 30, минимально регистрируемое смещение 0,1 нм, а порог обнаружения по силе 1 мкН, в полосе частот 0,1 Гц–1 кГц. Типичным режимом работы наноинденторов при профилировании является сканирование в режиме постоянной силы прижима. Это своеобразный аналог контактного режима в АСМ. Благодаря высокому разрешению по силе и использованию высокоэффективных систем виброизоляции, типичный наноиндентор может сканировать поверхность при уровне прижима в несколько мкН (типичная величина для приборов типа НаноСкан-4D и G200 от 5 мкН до 10 мкН, специальные модули наноинденторов фирмы Hysitron обещают сканирование с уровнем прижима в несколько сотен нН [2]). В таком режиме с использованием датчика боковой силы можно одновременно с профилем рельефа поверхности получать информацию о коэффициенте сухого трения острия индентора о

поверхность материала. Неприятной особенностью такого режима работы является неизбежная модификация поверхности исследуемого изделия.

Существенно повысить качество сканирования поверхности прибором НаноСкан-4D удалось, реализовав режим, аналогичный режиму полуконтактного резонансного возбуждения кантилевера. Из двух возможных режимов контроля прижима колеблющегося зонда к поверхности (по изменению амплитуды и по изменению сдвига фазы) был выбран режим фазового контроля сдвига резонансной частоты, так как последний обеспечивает как большее быстродействие, так и наименее подвержен влиянию разного рода возмущающих факторов. Использование динамического метода контроля контакта зондирующего острия с поверхностью позволило на порядок понизить уровень среднего значения силы взаимодействия острия с поверхностью за счет использования резонансного режима возбуждения сенсорной системы подвеса [3]. Было испытано несколько алгоритмов измерения сдвига резонансной частоты при контакте с поверхностью, а также режимы работы с различной амплитудой колебаний зондирующего острия.

Пример протяжённого профиля сложной пресс-формы, полученный с использованием прибора НаноСкан-4D, представлен на Рисунке 1 (амплитуда колебаний зондирующего острия была 100 нм, уровень силы взаимодействия составлял менее 1 мкН).

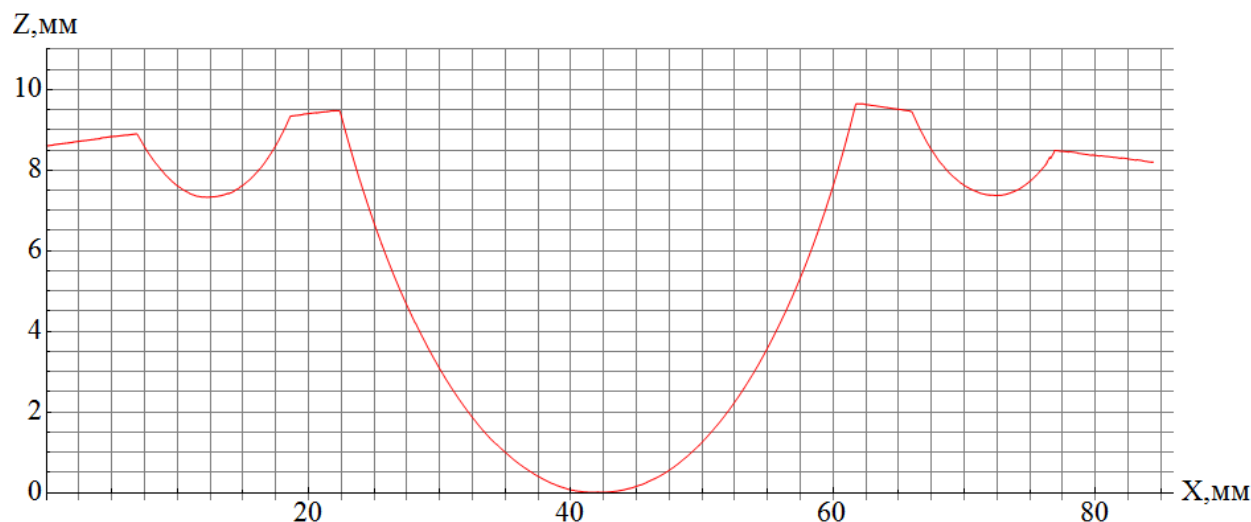


Рисунок 1. Пример профиля, полученного на твердомере НаноСкан-4D.

Проведённое исследование показало, что оптимальная амплитуда резонансных колебаний должна на порядок превышать уровень сейсмического шума в лабораторном помещении, а самым эффективным и быстрым способом контроля контакта является метод регистрации фазового сдвига между возбуждающей силой и возникшими колебаниями.

1. И.И. Маслеников, В.Н. Решетов, Б.А. Логинов, А.С. Усеинов Картографирование механических свойств наноструктурированных материалов с помощью пьезорезонансного зонда, *Приборы и техника эксперимента*, **3** (2015).
2. [www.hysitron.com](http://www.hysitron.com)
3. А.С. Усеинов, В.Н. Решетов и др. Исследование свойств тонких покрытий в режиме динамического механического анализа с помощью сканирующего нанотвердомера «НаноСкан-4D», *Наноиндустрия*, **1** (2016).